

BEVEZETÉS	2
ANYAG ÉS MÓDSZER.....	2
1. A helyszín és a vizsgált növény	2
2. Az alkalmazott modell bemutatása dióhéjban.....	2
3. Az öntözési időpont meghatározására adaptált Jackson (1982) szerinti vízstressz-index (CWSI)	4
EREDMÉNYEK ÉRTÉKELÉSE	4
1. A modell meteorológiai inputjainak előállítása a standard meteorológiai állomás adataiból (2003)	4
2. Az időjárás alakulása a megfigyelés 4 évében Keszthelyen.....	5
2.1 A kísérlet két humid évjáratának időjárása (2004 és 2005).....	5
2.2 Arid tenyészidőszakok: 2003 és 2006	6
3. A kukorica növekedése és fejlődése	6
3.1 A fenofázisok bekövetkezte és tartama	6
3.2 A zöldfelület alakulása a LAI hetenkénti változása alapján	8
3.3 A vízstressz-index évi változása az eltérő vízellátású kezelésekben	9
4 Állomány mikroklímára vonatkozó megfigyelések 2005-ben	11
5. Az öntözés hatása az állományon belüli két mikroklíma elemre: a cső szinti léghőmérsékletre és relatív légnedvességre	12
5.1 Az öntözés hatása a mikroklíma két elemére 2003-ban	12
5.2 Az öntözés hatása a mikroklíma két elemére 2006-ban	15
6. A mikroklíma elemek számítása modellezéssel	17
6.1 A kezdet: 2003	17
6.2 Eredmények 2004-ben	19
6.3 2005 tenyészidőszakának szimulációs eredményei	21
6.4 Az utolsó évjárat: 2006 nyara	21
FONTOSABB KÖVETKEZTETÉSEK	24
IRODALOM	25

BEVEZETÉS

Valószínűleg az alkalmazók szűkebb köre miatt a mikroklíma modellek egyike sem rendelkezik a produktív modellekhez hasonló globális elterjedéssel. A kukorica mikroklímájának szimulációjára Európában Goudriaan (1977) készített modellt, amelynek Chen (1984) nevéhez fűződő PC-re történő átalakítása egyszerűsítéseinek köszönhetően kibővítette a lehetséges felhasználók körét. A modellt a szerző később ismét áttekintette (Goudriaan és van Laar 1994). A modell elkészítését számos korábbi szintetizáló publikáció alapozta (Sellers 1965, Evans 1972, Nobel 1974, Rosenberg 1974, de Wit és Goudriaan 1978 stb). A munka a modell megjelenését követően sem fejeződött be, s a növények mikroklímájáról Jones 1983-ban jelentetett meg egy átfogó, akár elméleti kézikönyvnek is tekinthető művet.

A 4 évre tervezett megfigyelés célja a természetes csapadék ellátású és a növény tényleges vízigényének követése alapján öntözött kukorica mikroklímájának szimulációs modellel történő előállíthatóság vizsgálata volt. Bár az öntözés növény mikroklímájában előidézett hatása régóta ismert, a műszertechnika fejlődésével nyert korábbiaknál pontosabb mérések a kiegészítő vízellátás hatására bekövetkező módosulások ismételt áttekintését indokolják. A modellezés alapot nyújthat a mikroklíma különböző emberi beavatkozás eredményeképpen fellépő eltéréseinek jobb megismeréséhez. Az öntözött növények mikroklímájának alaposabb ismerete a későbbiekben a termesztés gyakorlatában is szerepet kaphat (pl. növénybetegségek elterjedése, a környezeti feltételek összekapcsolása a védekezés folyamataival).

ANYAG ÉS MÓDSZER

1. A helyszín és a vizsgált növény

A keszthelyi Agrometeorológiai Kutatóállomáson évek óta folynak mikroklíma szimulációs kísérletek kukoricára, melyben Goudriaan (1977) szimulációs modelljét, ill. annak Chen (1984) által PC-n is futtatható változatát használjuk.

A növények folyamatosan a helybeli agráregyetem szakembereinek javaslata alapján a környékre jellemző agrotechnikában részesültek.

A parcellák egy részét öntöztük (terület: 0,25 ha), az öntözőcsövek elhelyezése miatt a kontroll és az öntözött parcellák elhelyezése blokk-rendszerben történt. Az öntözést csepegtető eljárással végeztük a lehető legkisebbre csökkentve ezzel a lehetséges párolgási veszteséget. A „real-time” öntözés tervezésben rejlő víztakarékosság lehetőségét kihasználva alkalmanként csak kevés vizet, mintegy 20-40 mm-t juttattunk ki a területre, 6-8 mm/óra intenzitással. Az infra-technika (RAYTEK típusú infrahőmérővel) alkalmazásával, a felszínhőmérséklet detektálásával a vízhiányt annak fellépte idején, s még a szemmel látható tünetek (lankadás stb.) megjelenése előtt jelezhattük. A vízutánpótlás is ennek megfelelően többszöri, kis vízádag adagolásával a legkedvezőbb, a lehetséges túl öntözés - természetes csapadékból eredő víz megjelenésekor – teljes kiküszöbölésével.

2. Az alkalmazott modell bemutatása dióhéjban

Goudriaan modelljének alapja a sugárzási energia állománybeli sorsának követése, melynek egy része visszaverődik az állományról, a másikat átterjeszti az adott réteg, s a harmadikat elnyelik a növények. Az állományok által elnyelt sugárzási energia szenzibilis- (H) és látens hővé (λE) alakul. A növények és a levegő hő-tárolását, valamint a fotoszintézisben megkötött

energiát, tekintettel azok mértékére, a modell elhanyagolja, kivéve a legalsó, talajközeli réteget, ahol ugyanezt a talaj hőtárolásával nem lehet megtenni (Chen 1984).

Az állomány i -edik rétegében a szenzibilis hő:

$$H_i = \rho c_p \frac{T_{ci} - T_{ai}}{r_{aHi}} \quad (1)$$

ahol $T_{ci} - T_{ai}$: növény- és léghőmérsékleti differencia ($^{\circ}\text{C}$),

r_{aHi} : hőre vonatkozó aerodinamikai ellenállás (s m^{-1}),

ρ : a levegő sűrűsége (kg m^{-3}),

c_p : a levegő állandó nyomáson vett fajhője ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$).

A látens hő ugyanebben a rétegben:

$$\lambda E_i = \rho c_{p_c} \{q^*(T_{ci} - q)\} / [\gamma(r_{awi} + r_{ci})] \quad (2)$$

ahol $q^*(T_{ci}) - q$: adott levélhőmérséklethez tartozó telítési- és a tényleges vízgőz koncentráció különbsége (hPa),

r_{ci} és r_{awi} : az állományra és a vízre vonatkozó aerodinamikai ellenállás (s m^{-1}),

γ : pszichrometrikus konstans [hPa K^{-1}],

λ : a víz halmazállapot változásához szükséges energia [J g^{-1}].

A modell bemenő paraméterei négy nagyobb kategóriába sorolhatók (Páll *et al.* 1998).

A modell bemenő meteorológiai elemeit az állomány fölötti referencia szintben elhelyezett adatgyűjtő rögzíti, vagy a hálózatos megfigyelő állomások adatainak megfelelő konvertálásával állíthatjuk elő azokat (Anda *et al.* 2003). A kimenő adatokból a CMSM alapvető célját jelentő léghőmérséklet (T_a) és vízgőznyomás értékeit a cső szintre (i) vonatkozóan értékeltük, melyek számítása az alábbi egyenletek alapján történt:

$$T_{a,i} = T_{a,i-1} + H_i R_i / \rho C_p \quad (3)$$

$$e_i = e_{i-1} + \lambda E_i R_i (\rho C_p / \gamma) \quad (4)$$

ahol e : vízgőznyomás [Pa],

R : ellenállás jellegű mennyiség [s m^{-1}].

A két mikroklíma elem becslésének pontosságát a becslési hiba %-kal ellenőriztük, melynél a mért és szimulált napi átlagok eltérését az elem napi közepének %-os arányában fejeztük ki.

Az ismertetett Goudriaan CMSM modellt 2003-ban mind a standard meteorológiai, mind az állomány feletti referenciaszintről származó input meteorológiai adatokkal futtattuk. A szimuláció(k) megbízhatóságának ellenőrzésére a két szimulált adatsort az állomány csőmagasságában (110 cm) radiációs ernyőben elhelyezett, ugyancsak QLC-50 típusú automata klímaállomáshoz kapcsolt HMP 35-ös kombinált szenzor által mért léghőmérséklet és légnedvesség adatokkal hasonlítottuk össze.

A mikroklíma elemeiből a léghőmérsékletet és a légnedvességet a kifejlett növény cső szintjében hőmérőházban elhelyezett adatgyűjtőhöz kapcsolt kombinált szenzorokkal regisztráltuk. A mért és a szimulált értékek összehasonlítását a 4 másodpercenként vett

mintákból előállított 10 perces átlagokkal, óraátlagokkal ill. a nappali órákra számolt és az éjszakai órákra meghatározott napi középértékekkel végeztük. Pontosítást jelentett a modell alkalmazásában a teljes napra meghatározott átlag helyett a napszakonként eltérő időre is számolt középértékek felhasználása. Az elemzésnél néhány mintanap időjárása (csapadék jelenléte) a valóságtól annyira eltérő mikroklima szimulációt eredményezett, hogy a fenti napokat értékelni nem tudtuk, mivel a modell ezekben az időjárási helyzetekben nem futott le.

A modell bemenő növényi paramétereként a mért levélterület-index, a LAI, a levél sűrűség 3 szintben, s a növénymagasság szolgált. A LAI-et kezelésként 10-10 az állomány átlagát reprezentáló, előre megjelölt mintanövény adatai alapján mértük LI-3000 típusú automata planiméterrel hetente.

Az input meteorológiai adatokat a helyi standard QLC-50 automata állomás adat-állományából emeltük ki a mérésekhez legközelebb eső 10 perc adataiból számolt átlaggal.

3. Az öntözési időpont meghatározására adaptált Jackson (1982) szerinti vízstressz-index (CWSI)

Az index részleteiben lásd. a fenti hivatkozású és számos hazai adaptációt bemutató (Anda 2001 stb.) publikációban.

A növény párologtatása korlátlan vízellátásnál potenciális párologás (potenciális evapotranszspiráció, *PET*). Ha a talaj vízutánpótlása csökken, a párologás is mérséklődik (tényleges evapotranszspiráció, *ET*). A kettő hányadosa egy indexet, a CWSI-t adja, amely alkalmas a növény vízellátottságának a megítéléséhez.

$$CWSI = 1 - \frac{ET}{PET} = \frac{\gamma(1 + r_c / r_a) - \gamma^*}{\Delta + \gamma(1 + r_c / r_a)} \quad (5)$$

ahol r_c és r_a : a növény és aerodinamikai ellenállásai s/m-ben.

A fentiek ismeretében a CWSI meghatározásához nettó sugárzás, állomány- és léghőmérséklet, légnedvesség, több szintben történő szélsősebesség és növénymagasság mérésére van szükség. (A két utóbbit az r_a meghatározásához szükséges figyelembe venni.)

Az index legfontosabb növényre vonatkozó bemenő paramétere a növényhőmérséklet (értéke az ellenállásokban szerepel). Magas napállásnál zavartalan besugárzás mellett naponta mértük alakulását. A RAYNGER II.RTL típusú infrahőmérőt a vízszintessel 30°-ot bezáró szögben, 0,96-os emissziós tényezőt feltételezve, kézben tartva, az állomány feletti kb. 1 m-es magasságban alkalmaztuk (Anda 1993). Akkor öntöztünk, amikor az általunk meghatározott $CWSI > 0,25$ -et (ábráinkon $CWSI \times 10 > 2,5$). A határérték megállapításánál a helyben végzett kukorica öntözési kísérlet tapasztalatait is felhasználtuk.

A CWSI detektálására állományzáródás után van lehetőség, mert meghatározó elemét, a növényhőmérsékletet nagy biztonsággal csak záródott állománynál tudjuk mérni ($LAI \geq 2,0$ - $2,5$). Ennek fellépte évjáratfüggő, korai hibrideknél Keszthelyen általában július hónap folyamán következik be. Az évek többségében korábban ritkábban szükséges az öntözés, s ha mégis, azt a talajnedvesség alakulása alapján végezzük.

EREDMÉNYEK ÉRTÉKELÉSE

1. A modell meteorológiai inputjainak előállítása a standard meteorológiai állomás adataiból (2003)

[A fejezet eredményei részletesen lásd. „A standard meteorológiai állomás adatainak felhasználási lehetősége mikrometeorológiai modell inputjaként.” című publikációban 2003-ban a Léghő (2:28-33) folyóiratban. Szerzők: Anda, A., Lőke, Zs. és Varga, B.]

A standard körülmények közötti, öt centiméteres nyírt fűfelszín felett 2 méteres magasságban mért, valamint a két méteres kukoricaállomány talajfelszínétől 3 méteres referenciaszinti magasságból származó léghőmérsékletek kapcsolata szorosnak mutatkozott. Az eltérés a két adatsor napi átlagai között a hőmérsékletben mindössze 0,3 % (0,07°C), a relatív nedvesség tartományban 8,99% volt. Az egyes eltérő időjárású napok kategóriáinál az eltérés nagysága lényegesen nem változott.

A relatív nedvesség vizsgálatánál a standard relatív nedvesség adatok (S) egyszerű konstanssal (c) történő beszorzással referenciaszinti adatokká (R) átalakíthatók az $R=c \cdot S$ egyenlet alapján. Esetünkben a konstans: 1,14. A légnedvesség magas, RMSD=9,15 értékének magyarázata, hogy a relatív nedvességet nem tizedes törtben, hanem egész számmal %-os értéként elemeztük a statisztikai vizsgálatokban, s a szórás jellegű mutató számítása során is.

	T_a [°C]	Rh [%]
RMSD	0,2263	9,150
Regressziós együttható	1,003	1,141
A populációs regressziós együttható		
95%-os konfidencia intervalluma	[1,000;1,006]	[1,134;1,148]
Determinációs együttható (R ²)	0,999	0,999
A regr. együttható standard hibája	0,001	0,003
A reziduumok (hibák) szórása	0,214	1,446

A statisztikai analízis eredményei alátámasztották eredeti feltevésünket, miszerint a kellően közeli meteorológiai állomások standard adatai a léghőmérséklet esetében egy az egyben, a légnedvesség értékeknél pedig az 1,14-es konstanssal történő beszorzás után megfeleltethetők a kukoricaállomány feletti referenciaszinti (felszín feletti 3 m-es) modell input adatainak. A későbbiekben a szimulációs modell futtatásánál a fent említettek alapján jártunk el.

2. Az időjárás alakulása a megfigyelés 4 évében Keszthelyen

2.1 A kísérlet két humid évjáratának időjárása (2004 és 2005)

A 2004-es év tenyészidőszakának időjárása sajátosan tért el a megfigyelés első évének, 2003-nak időjárásától, mely aztán az öntözéses kísérlet menetét, a növényi jellemzők alakulását is befolyásolta. Addig, amíg 2003 vegetációs ciklusának átlaghőmérséklete 1,6°C-kal meghaladta a klímanormált, 2004-ben 0,4°C-kal hűvösebb volt annál. Ha csak a csapadék mennyiségét tekintenénk, akkor arra a megállapításra kellene jutnunk, hogy mindkét évben a szokásosnál kevesebb eső hullott, bár a nedvességihiány mértéke 2003 mintegy 30 mm-rel meghaladta a 2004-ben mértéket. A csapadék megoszlása azonban azonnali magyarázattal szolgál a két évjáratban tapasztalt sajátosságokra vonatkozóan. 2004 tavaszán a talajok feltöltődése –szemben a korábbi évjáratokban tapasztaltakkal- a sokévi átlagnál 80 mm-rel több csapadékkal megtörténhetett. Ez a kezdeti vízellátásból adódó előny a növényi paraméterek alakulása szempontjából rendkívül pozitív volt, s a vízellátás a tenyészidőszak kezdeti szakaszában képes volt kielégíteni a növény vízigényét.

2005 során - 2004-hez hasonlóan - nem volt szükség öntözésre Keszthelyen. 2005 tenyészidőszaka az 1971-2000-es klímanormálhoz viszonyítva, a hőmérséklet tekintetében ugyan átlagos, de az átlagnál csapadékosabb nyári hónapok, köztük az augusztusi rekord

csapadék miatt is humid időjárás jellegű évjárat volt. 2005 nyarán a sokévi átlagnál 43%-kal több csapadék hullott. 2005 humid időjárása az öntözést feleslegessé tette.

2.2 Arid tenyészidőszakok: 2003 és 2006

2003 nyara része annak a több éve tartó száraz és meleg hullámnak, mely 2000-ben kezdődött, s felhívta sokak figyelmét a globális felmelegedés esetlegesen várható hazai következményeire. A 2003-ban induló méréseinket megelőző évjáratok rendre melegebbek és csapadékhiányosabbak voltak a sokéves átlagnál.

2003 tavaszán induló vízkészletből a sokéves átlagos évi csapadékösszeg mintegy 70%-a hiányzott. Ebben az évben a tenyészidőszak átlaghőmérséklete is túlszárnyalta a sokéves átlagot, s annak emelkedése az évi átlagost némiképp meghaladva 1,6°C volt. 25,5% csapadék hiányzott az átlagoshoz képest, rendkívül kedvezőtlen megoszlással.

A vízhiány csökkentésére összesen 180 mm-nyi vízmennyiséggel öntöztünk, melyet rendkívül korán, már június 4.-én meg kellett kezdenünk, mert ellenkező esetben már nem lett volna mit öntöznünk. A száraz-meleg tavasz nem kedvezett a növények korai fejlődésének. Az évjárat sajátossága volt az is, hogy az utolsó öntözést július 16.-án végeztük, s a későbbiekben (egész augusztusban) nem igényeltek vizet növényeink.

2006 tenyészidőszakának időjárása sajátosan alakult. Félrevezető lenne, ha a teljes tenyészidőszakot egyetlen sokéves átlagtól vett eltérés adattal jellemeznénk, mely a léghőmérsékletnél 0,7°C-kal melegebb, a csapadéknál pedig 19,3mm-rel nedvesebb időjárást jelezne. Ez volt az az évjárat, ahol a tenyészidőszak időjárásának alakulását havonta érdemes áttekinteni annak rendkívüli változékonysága miatt. A vegetációs időszak áprilisban +1,6°C-kal magasabb hőmérséklettel, s több mint 30 mm csapadéktöbblettel indult. A csapadékbőség májusban tovább folytatódott (+40,2 mm), a szokásosnál fél fokkal hűvösebb időjárással. Június mindkét meteorológiai elem tekintetében közel átlagosnak mondható. Júliusban a rendkívüli meleg (+2,1°C-al magasabb havi középhőmérséklet) az átlagosnál több mint 50 mm-el kevesebb csapadékkal társult. Augusztus a sokéves átlagnál két fokkal hűvösebb volt, s a havi csapadékösszege 75 mm-el haladta meg a korábbi augusztusok átlagát. A hűvös időjárásra jellemző, hogy a hónap napjainak maximum hőmérséklete sohasem érte el a 30°C-ot, s mindössze 8 napon haladta meg a 25°C-ot. A csapadék intenzitását jelzi, hogy 3 napon esett 20 mm-t meghaladó csapadék mennyiség. A hűvös csapadékos augusztus jelentősen késleltette a kukorica teljes érését. Az ősz meleg és száraz időjárással köszöntött be Keszthelyen.

2006 során júliusban öntöztünk, (július 19.-én és július 27.-én) 40-40 mm vízfelhasználással.

3. A kukorica növekedése és fejlődése

3.1 A fenofázisok bekövetkezte és tartama

3.1.1 A kontroll növények fejlődése

A négy vizsgált évben a kukorica vetése április végén-május elején történt. Az évenkénti vetés idejét az időjárás (felmelegedés beköszönte, talaj nedvesség tartalom alakulása) mellett az egyetem többi parcelláján folyó munka is meghatározta (3.1 táblázat).

3.1 táblázat A kukorica fenofázisainak bekövetkezési időpontjai a kontroll parcellákon 2003-2006 között Keszthelyen. A táblázatban az állományzárodást, mint a növényhőmérséklet mérések kezdetét determináló tényezőt tüntettük fel.

	2003	2004	2005	2006
Vetés	Április 26.	Április 29.	Május 6.	Május 10.
Kelés	Május 5.	Május 7.	Május 17.	Május 18.
Állományzáródás	Június 9.	Június 21.	Június 27.	Június 26.
Címerhányás	Július 7.	Július 12.	Július 14.	Július 21.
Tejesérés	Július 18.	Augusztus 2.	Augusztus 8.	Augusztus 7.
Viaszérés	Július 28.	Augusztus 16.	Augusztus 16.	Augusztus 21.
Teljesérés	Augusztus 8.	Augusztus 30.	Augusztus 30.	Szeptember 4.

A legnagyobb eltérés a kezdő 2003-as év és a záró 2006-os év vetés-időpontjai között volt, mely különbség elérte a 2 hetet. 2006 tavaszán a felmelegedés nagyon lassan következett be, s az 5 cm-es réteg 8-10°C-os talajhőmérséklete csak május első dekájára alakult ki (3.2 táblázat). Ez a késedelem aztán rányomta bélyegét az egész 2006-os tenyészidőszakra, s az egyes fenofázisok bekövetkezési időpontjai is időben később következtek be, bár hosszúságuk lényegében nem változott a korábbi években tapasztalt fenofázishosszakhoz képest.

3.2 táblázat A parcellán termesztett nem öntözött kukorica fejlődése egész napokra kerekítve a vizsgálat 4 tenyészidőszakában Keszthelyen

Év/nap	Vetés- kelés	Kelés- címerh.	Címerh.- tejes é.	Tejes é.- viasz é.	Viasz é.- teljes érés	Tenyészidőszak hossza \pm SD
2003	9	63	11	10	11	104
2004	8	66	21	14	14	123
2005	11	58	25	8	14	116
2006	8	64	17	14	14	117
<i>átlag \pm SD</i>	<i>9 \pm 1</i>	<i>63 \pm 3</i>	<i>18 \pm 5</i>	<i>12 \pm 3</i>	<i>13 \pm 1</i>	115 \pm 8

Az egyes fejlődési szakaszok hosszúságában a legnagyobb szórást érdekes módon nem a leghosszabb tavasz végi-nyár eleji vetés-kelés szakaszban tapasztaltuk, hanem a kukorica közismerten legérzékenyebb fenofázisában, a címerhányás-tejes érés periódusában, ahol értéke elérte a ± 5 napot. A hűvös-csapadékos időjárás fejlődést meghosszabbító hatása a 4 év során a legjobban ebben a fenofázisban jelentkezett. A humid jellegű, öntözés nélküli 2004-2005-ben 21 ill. 25 nap kellett címerhányástól a tejes érés bekövetkeztéig. Ugyanennek a fenofázisnak a hossza a két öntözött évben (2003 és 2006) mindössze 11 ill. 17 nap volt. A legkisebb változékonysággal a fejlődés elején és végén találkoztunk, ahol a fenofázisok szórása mindössze ± 1 nap volt.

Az általunk vizsgált Norma rövid tenyészidejű kukorica hibridnél száraz körülmények között a tenyészidőszak hosszának átlagos tartama 115 nap volt, melytől évjáráttól függően 1-1 hetes eltérés bármikor bekövetkezhet.

3.1.2 Öntözött kezelések fejlődése 2003-ban és 2006-ban

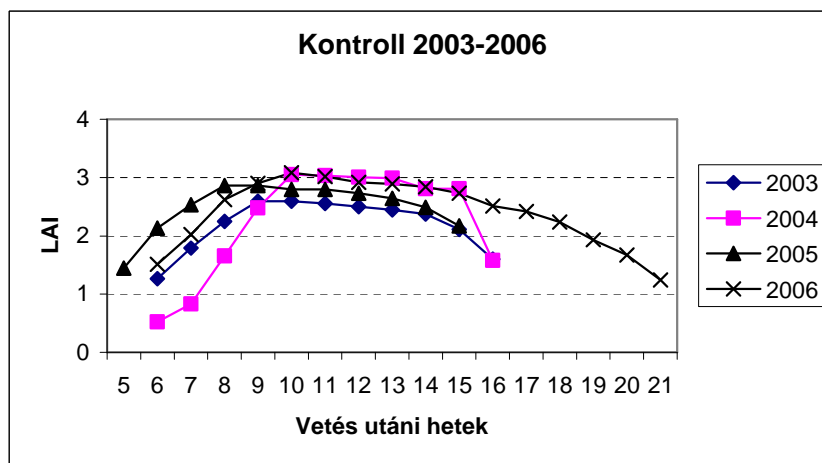
Az öntözés a kukorica fenofázisainak bekövetkezési időpontjában lényeges eltérést a vízkijuttatás egyik évében sem okozott, mindössze néhány nap késedelmet eredményezett a többlet víz adagolás az egyes fázisok megjelenési idejében. Itt jegyezzük meg, hogy bár csak tendencia jelleggel, de a teljes érés időpontja mintegy 3-5 napot késett az öntözött kezelésekben a nem öntözött kontrollhoz képest. Az öntözés az egyes fázisok időtartam-hosszúságának szórását a nyári időszak közepén –állományzáródás-címerhányás-tejes érés táján- néhány nappal mérsékelte, vagyis a fejlődést némiképp kiegyenlítettebbé tette.

Az általunk alkalmazott öntözési eljárás, a kizárólag a növény vízigénye alapján megvalósított, csekély vízádagokkal végrehajtott vízutánpótlás hatása a növények fejlődésére jóval mérsékeltebb volt, mint ahogyan azt a korábbi irodalomból megismerhettük.

3.2 A zöldfelület alakulása a LAI hetenkénti változása alapján

3.2.1 A kukorica LAI-e öntözés nélkül (2003-2006)

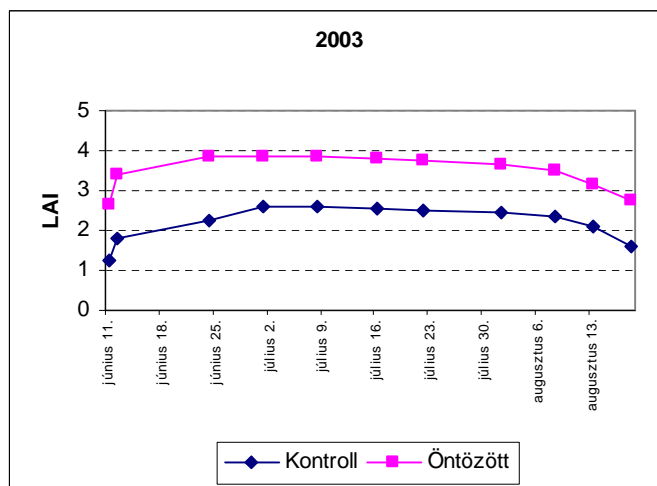
Az évi átlagos zöldfelület nagysága gyakorlatilag azonosnak tekinthető mind a négy tenyészidőszakban, hiszen mindössze néhány tizednyi levélfelület-index-beli eltérést regisztráltunk a kísérlet során (3.1 ábra). Az asszimiláló zöldfelület hetenkénti alakulását a vetés után eltelt hetek szerint közös ábrán mutatjuk be a vizsgálat négy évére. A fejlődés üteme a nem öntözött állományokban a kezdeti időpontokban és 2006 tenyészidőszakának végén tendencia jelleggel különbözött egymástól (szignifikáns eltérés csak egy-egy mérési időpontban jelentkezett). 2006 őszének rendkívülisége a zöld levelek tartóssága volt, ezért méréseinket, szemben a korábbi évjáratokban tapasztaltakkal, egészen október elejéig folytatnunk kellett.



3.1 ábra A LAI alakulása az öntözés nélkül termesztett kukoricában Keszthelyen, 2003-2006

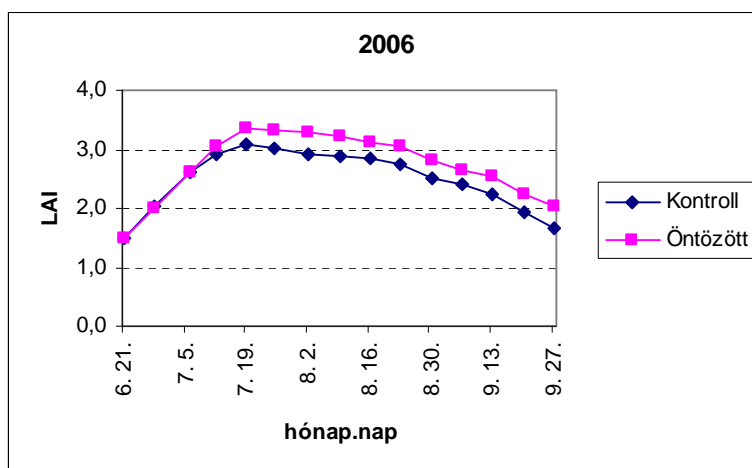
3.2.2 Az öntözés hatása a zöldfelületre

2003-ban a kora tavaszi öntözés kedvező hatása az állományzáródás előtt jelentkezett, mintegy 2000 cm²/növény levélfelület többlet kialakításával (3.2 ábra). A kiegészítő vízellátásban részesült növények zöldfelület növekménye az öntözés befejezésével majdnem a felére esett vissza (1200-1300 cm²), de gyakorlatilag az egész tenyészidőszakban, az öntözés befejezése után is megmaradt. Évi átlagban a többlet víz 45,6%-os szignifikáns LAI emelkedést eredményezett a kontroll kezelés asszimiláló felületéhez képest. Augusztus végén a leszáradásban eltérés a kontroll és az öntözött állományok között nem alakult ki.



3.2 ábra A LAI évi változása a két eltérő vízellátású kukorica állományban Keszthelyen 2003

2006 enyhe és csapadékos ősze miatt fellépő lassú levél-leszáradás nemcsak a kontroll kezelések jellemzője volt (3.3 ábra). Ebben az évben az öntözés hatása messze elmaradt a 2003-ban tapasztalttól, mivel ekkor a kiegészítő vízkezelésű növények évi átlagban mindössze 9,2%-os LAI növekedést mutattak, mely csak néhány időpontban jelentett szignifikáns különbséget.



3.3 ábra A LAI értékei két vízkezelésű kukoricában Keszthelyen 2006 tenyészidőszakában

A magasabb zöldfelület megjelenése – szemben a 2003-as évjáráttal- az állományzáródást követő öntözés megkezdésével realizálódhatott, s a korai öntözés befejezés ellenére (július 27.) az egész tenyészidőszakban –bár igen csekély mértékben, de- megmaradt.

Összegezve megállapítható, hogy 2003-ban a 180 mm-es vízkiegészítés zöldfelületben előidézett pozitív hatása (45,6%) többszörösen meghaladta a 2006-os évjárat 80 mm-es öntözővízzel elért LAI növekedésének (9,2%) mértékét. 1 mm öntözővíz az évi átlagos LAI-ben 2003-ban 0,25%-nyi növekedést, 2006-ban pedig ennek a felét, mintegy 0,12%-nyi felület növekedést eredményezett.

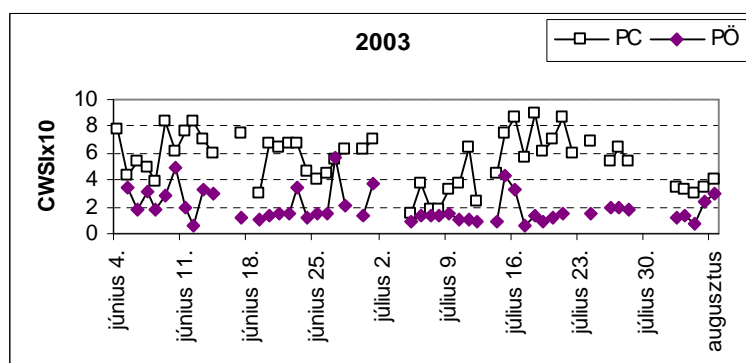
3.3 A vízstressz-index évi változása az eltérő vízellátású kezelésekben

Az általunk vizsgált 4 évből mindössze a fele volt arid időjárású, ahol a növények vízigényét kiegészítő vízellátással pótoltuk. Ez az információ azért lényeges, mert a megfigyelés valamennyi tenyészidőszaka a 2000-et követő „meleg-szárazként” ismert periódusban található, mely sokak szerint főképpen aszályos évekből áll. Ezt, a két öntözést nem igénylő évjárat megerősíteni nem tudja.

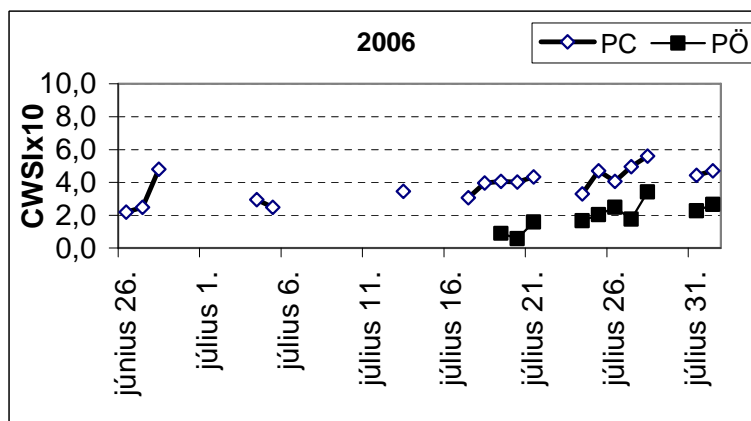
2003 és 2006

A vízstressz-indexek tenyészidőszakbeli dinamikája pontosan követte az időjárás (mind a hőmérséklet, mind a csapadék) változásait. 2003 meleg-száraz júniusára utal a kontroll kezelés több alkalommal 8-at (CWSIx10) meghaladó érték alakulása (3.4 ábra). A július elején és legvégén lévő „szaggatott” görbe több napra kiterjedő „hiányos” mintaszáma mutatja a felhős napok számának megnövekedését, melyről ismeretes, hogy a növényhőmérséklet-minta gyűjtését, s ezzel az index meghatározást nem teszi lehetővé. A többi mintanapokon, ahol a környezeti feltételek a mérést engedték, magas indexeket detektáltunk. A rendkívüli meleg és aszályos év miatti gyors levél leszáradás (kényszerérés) a CWSI megfigyelések szokásosnál jóval korábbi befejezését vonták maguk után, mely szerint augusztus első dekádjában a kukorica száradása miatt megfigyeléseinket be kellett fejeznünk. Az öntözés 2003-ban az index évi átlagát több mint a felére csökkentette (5%-os szinten szignifikáns az eltérés). Az évi átlag a kontroll kezelésben 5,5, az öntözöttnél pedig mindössze 1,9 volt. Ez a változás 40-50%-os termés növekedést prognosztizált, mely a valóságban be is következett.

2006-ban (3.5 ábra) a júniusra számolt kontroll kezelésben mért határértéket meghaladó stressz index (4 körüli) félrevezető lehet, mely nem a magas növény hőmérséklet eredménye, hanem a talajé, ugyanis ebben az évben a késői vetés miatt az állomány záródása csak június legvégén következett be, s a mintavételezésnél a talaj hatását kiszűrni csak a látószög lényeges módosításával lehetett volna. A talajnedvesség alapján vízhiány júniusban nem volt. Július közepétől a hónap végéig, az indexalakulást figyelembe véve, két alkalommal kellett vízkiegészítést adni növényeinknek, mely meglehetősen súlyos vízhiány jelenlétére utal. A rendkívüli augusztusban 18 csapadékos napunk volt, s a többi napokon is dél körül legtöbbször felhős idő dominált, mely nem adott lehetőséget pontos növényhőmérséklet detektálásra, s ezzel CWSI meghatározásra. Ennek ellenére egy-egy próbálkozásunknál az index értéke a megengedett határérték alatt maradt.



3.4 ábra A vízstressz-index tenyészidőszakbeli változása 2003-ban a kontroll (PC) és az öntözött (PÖ) kezeléseknél



3.5 ábra A vízstressz-index tenyészedőszakbeli változása 2006-ban a kontroll (PC) és az öntözött (PÖ) kezelésekben

Érdekes módon 2006 során az öntözött kezelés tenyészedőszakbeli CWSI átlaga megegyezett a 2003-ban azonos kezelésben mérttel (1,9). 2006-ban a kontroll átlaga a 2003-as évnél alacsonyabb (3,9). Az indexek alapján 2006-ban az öntözéstől a 2003-as évnél mérsékeltebb termésmenvelő hatást vártunk, mely végül 19%-ban állapotodott meg.

2004-2005

A fenti két évjárat egyikében sem haladta meg az index a kritikus határértéket, így a CWSI változásának közlésétől eltekintünk.

4 Állomány mikroklímára vonatkozó megfigyelések 2005-ben

2005-ben öntözni nem kellett, ezért az öntözés hatás-elemzését kiváltandó összehasonlító vizsgálatot végeztünk a kifejtett kukorica cső szintjében mért és a standard körülmények között mért léghőmérsékletre vonatkozóan. Az összehasonlítás idejének mindkét hónapja a szokásosnál jóval csapadékosabb és hűvösebb volt.

Az elemzésbe vont időszak 2005. július 5. és augusztus 31. közötti 48 mérő napot foglalta magában. Sajnos 10 napot adathiány miatt ki kellett zárunk a további vizsgálatból. A megfigyelt periódus jellemzése mérőnaponként azok időjárás alakulása alapján történt. A napok szétválasztásának alapjául a napi csapadék- és globálsugárzás összeg, a napsütéses órák száma, valamint a szélerősség szolgált. A besugárzás (napállás) a vizsgálat két hónapjában jelentősen változik, ezért a derült és borult napok besorolásának határértékeit július és augusztus hónapokban eltérőnek választottuk úgy, hogy a napsütéses órák számát is vizsgáltuk. Szeles napnak tekintettük azokat a napokat, ahol a napi átlagos szélsősebesség 2 ms^{-1} fölötti volt, s az óránkénti maximális szélsebesség legalább $8,4 \text{ ms}^{-1}$ felett volt. Csapadékos az a nap, ahol a lehullott csapadék mennyisége a nap folyamán meghaladja az 1 mm-t.

A standard körülmények közötti, öt centiméteres nyírt fűfelszín felett 2 méteres magasságban mért QLC-50-es klímaállomás HMP-35-ös kombinált szenzorával mért, valamint a 2,1 m-es kukoricaállomány csőszint magasságából származó adatok kapcsolatát vizsgáltuk, 10 perces átlagok összehasonlításával.

Az eltérés a két adatsor napi átlagai között a hőmérsékletben mindössze $0,58\%$ ($0,09^\circ\text{C}$), a relatív nedvességtartalomban $2,27\%$ volt mely alapján megállapítható, hogy a cső szintben mért léghőmérséklet és légnedvesség napi átlagai lényegesen nem térnek el egymástól. Némiképpen meglepetésként szolgált, hogy a különböző időjárási feltételeknél mért eltérések alig különböztek egymástól (4.1 táblázat).

4.1 táblázat A mikroklíma két elemének napi átlagos eltérései különböző időjárási feltételeknél 2005 48 mintanapján

	Ta [°C]	Ta %-os eltérés	rH [%]	rH %-os eltérés
derült	0,004	0,11	-2,792	-3,80
csapadékos	-0,016	-0,15	-2,660	-3,34
borult	0,210	1,18	-3,598	-4,61
szeles	0,198	1,16	-0,027	0,39
Átlag (48 nap)	0,099	0,58	-2,269	-2,84

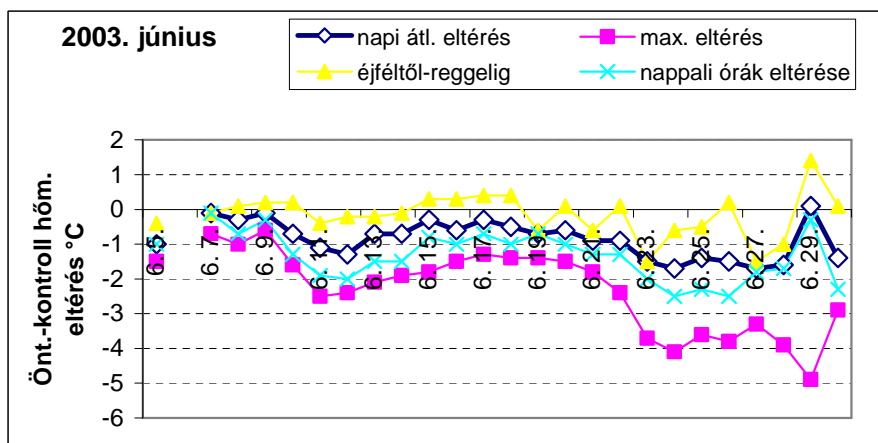
- 1) Csapadékos napokon a standard körülmények között 5 cm-es nyírt fűfelszín felett, illetve a kukoricaállomány csőmagasságában mért állományhőmérséklet között az eltérés a legcsekélyebb.
- 2) Csapadékhullás után néhány órában az állomány melegebb lehet
- 3) Derült időben a standard meteorológiai állomás léghőmérséklet adatai akár pár tized fokkal melegebbek vagy hűvösebbek is lehetnek a többi környezeti tényező jelenlététől függően.
- 4) A csapadékos napok kiegyenlítettebb légnedvessége –a léghőmérsékletéhez hasonlóan- itt is utolérhető volt. Már a csapadékos napoknál is fellelhető a tendencia, az éjszakai órák állomáson mért magasabb légnedvessége, mely ugyan csekélyebb (10% alatti) mértékű mint száraz napokon, de folyamatosan jelen volt az év során.
- 5) A megfigyelés hónapjától és időjárástól függetlenül az éjszakai órák állomási, a felszíntől 2 m-es magasságban mért légnedvesség értéke meghaladta az állományon belül mért légnedvesség értéke. Az eltérés esetenként igen magas, az éjszakai órák átlagában egy-egy napon elérheti akár a 15-20%-ot is, bár a legtöbb esetben 10% alatt marad.
- 6) A nappali órákban az állomány transzspirációja mérhető hatással bírt a legintenzívebben párolgó szint, a cső-közeli réteg légnedvesség tartalmára. A nappali órák átlaga szeles csapadékos időben csupán néhány %, derült szélcsendes időben 7-15% között alakult.

A két mikroklíma elemből a léghőmérséklet állományon belüli cső szinti értékei a standard körülmények között mért állomási adatokkal jól közelíthetők. A légnedvesség ennél összetettebb képet mutat. Valószínűleg a növénypárolgás komplex jelensége miatt az állomási adatok egy az egyben történő felhasználása még nagy körültekintés mellett sem javasolható.

5. Az öntözés hatása az állományon belüli két mikroklíma elemre: a cső szinti léghőmérsékletre és relatív légnedvességre

5.1 Az öntözés hatása a mikroklíma két elemére 2003-ban

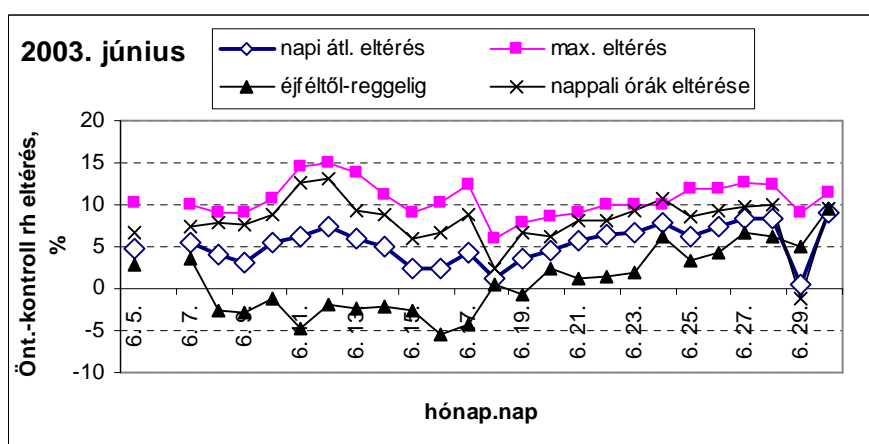
2003 júniusában a kiegészítő vízellátás az állományon belüli léghőmérsékletet a teljes hónap átlagában 0,9°C-kal mérsékelte (5.1 ábra). Az öntözés hatása a standard állomáson mért külső léghőmérséklet fokozódásakor némiképp emelkedett. A hónap végén (lásd. grafikon június 23-át követően) az öntözés hatása a léghőmérséklet napi átlagában meghaladta a 2°C-ot. Az ábrán maximális eltérés alatt a nap során az öntözött és a kontroll kezelésben azon 10 perc hőmérsékleti differenciáját értjük, mely az adott napon a legmagasabb volt.



5.1 ábra Az öntözés hatása az állományon belüli léghőmérsékletre kukoricában

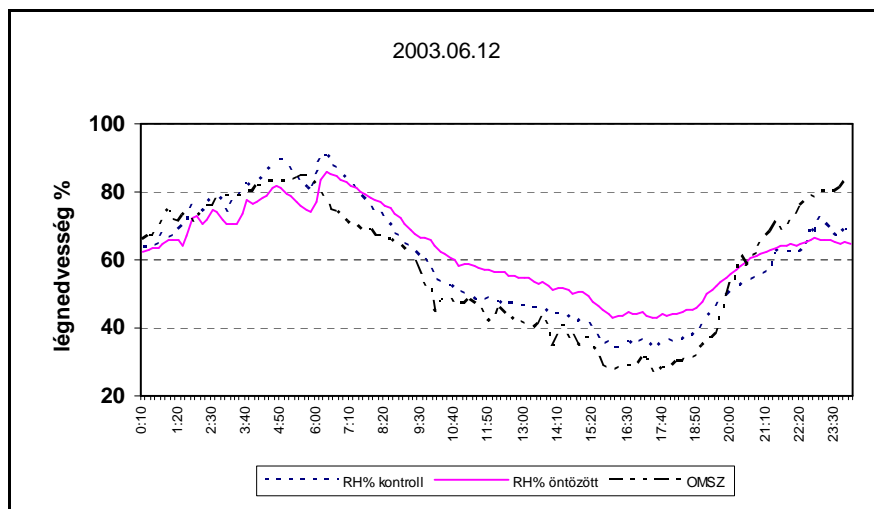
Az eltérés időbeli változásában a teljes napi átlag és a nappali órák hőmérsékleteinek különbsége esetenként nem csekély. A nappali órákban az öntözés átlagos hűtő hatása júniusban $1,3^{\circ}\text{C}$, mely mintegy fél fokkal meghaladta a teljes –nappali és éjszakai órák együttesen- napi átlagra meghatározott értéket. (Kiemelkedően meleg napokon a fenti különbség elérheti az 1°C -ot is.) Az eltérés oka az éjszakai, pontosabban főképpen a 0.10 perctől reggel 7.00-8.00 óráig fellépő, öntözött állományok kontroll léghőmérsékletét meghaladó volta. A napnyugtától éjfélig tartó periódusban legtöbbször a nappali órák öntözött kezeléseinek hűvösebb állománya volt a jellemző, bár az eltérés mértéke lényegesen alacsonyabbnak adódott, mint a 0 órától reggel 7 óráig tartó szakasz értékei. Az esetenkénti melegebb öntözött kezelés megjelenését sem a vízkijuttatás idejéhez, sem az időjáráshoz kötni nem tudtuk. Az öntözéshez közeli időpontban, forró napon a kiegészítésképpen juttatott víz hatása az állományon belüli léghőmérsékletre különösen erőteljes.

A léghőmérséklethez hasonlóan dolgoztuk fel az állományon belüli relatív légnedvesség öntözés hatására bekövetkező változásait (5.2 ábra). A teljes hónapra átlagolt eltérés 2003 júniusában 5%-os növekedést jelentett a kiegészítő vízellátásban részesült növényállományok javára. A csak a nappali órákra meghatározott változás több %-al magasabb a hónap elején, s a hónap második felében az eltérés mérséklődik. A hónap elején az éjszakai órákban az öntözött növények állományának relatív légnedvesség tartalma alacsonyabb volt a kontrollnál (3-5%), s ez csökkentette az öntözés hatását a napi átlagban.



5.2 ábra Az öntözés hatása a 2003 júniusi légnedvesség alakulására öntözött és kontroll kezelések eltérései alapján

A napi változások áttekintése magyarázatul szolgálhat a fenti nem várt jelenségre. Az öntözés ellenére a kontroll állományban éjszaka folyamatosan magasabb volt a levegő relatív légnedvesség tartalma (5.3 ábra).

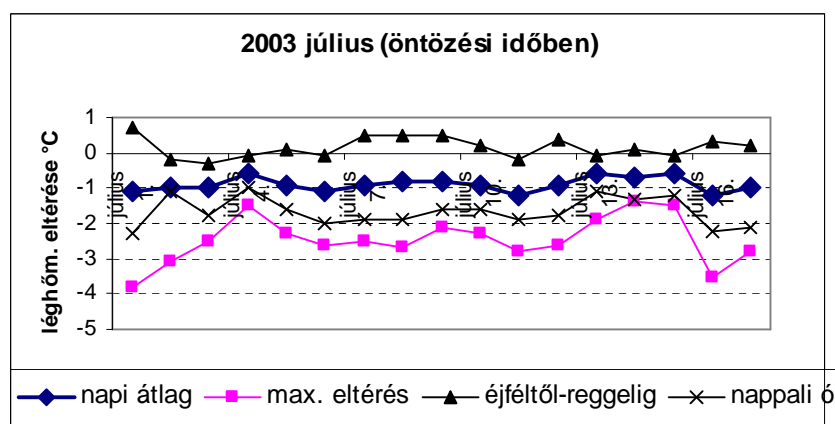


5.3 ábra A relatív légnedvesség tartalom jellemző napi változása június első felében

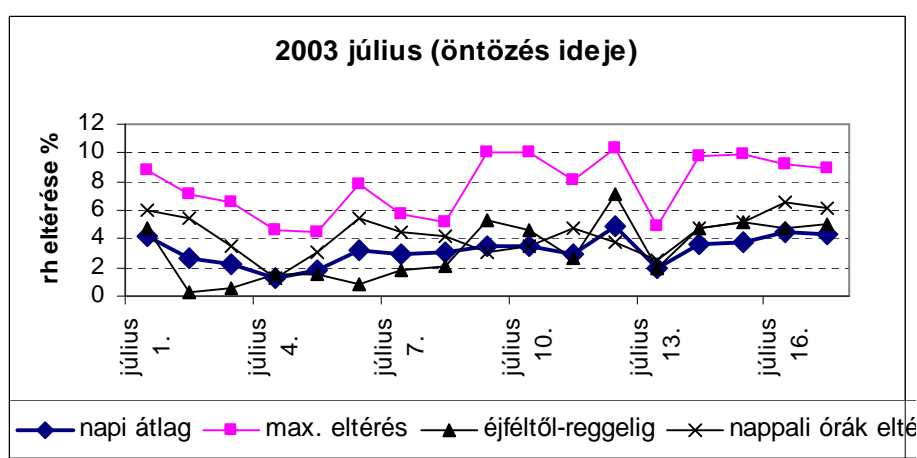
Az öntözött állomány éjszakai, kontrollhoz képest alacsonyabb relatív légnedvesség tartalma éppen ellenkező irányú, amint az várható volt. Ennek valószínű oka az öntözött kezelés magasabb LAI-e, a zártabb, s az éjszakai a kisugárzás ellen jobban védő nagyobb levélfelület lehetett, mely jobban visszatartotta a kisugárzott energiát, s ezzel magasabb állományi léghőmérsékletet eredményezett. A melegebb levegő nedvesség befogadó képessége nagyobb, ezáltal a relatív légnedvesség tartalom az öntözött növényeknél több %-al alacsonyabb lehet a kontrollnál. A változás mértéke a június 18. utáni szakaszban nem túlságosan magas, egy-egy tíz perces átlagban általában még az 5-8%-ot sem éri el, de a jelenség visszatérő, ezért feltétlen szükséges figyelembe venni. A hónap első felében nagyobb mértékű volt az eltérés, a 0.10-7.00 óra közötti szakaszban átlagosan mintegy 5% körüli, mely a napi átlagokra tekintettel azok meglehetősen alacsony voltára, nem volt hatástalan.

Az öntözés legnagyobb mértékű változást a légnedvességben közvetlenül a vízkijuttatást követő napon vált ki, ahol az eltérés 10% fölé emelkedhet. A 10 perces átlagokban a maximális differencia 14-16% volt. Az öntözést követő második naptól kezdve a víz hatása állandósul, s a hatás mértéke csupán az időjárási tényezők befolyásolása alatt áll.

2003 júliusában a két mikroklíma elem változásának tendenciája követte a korábbi hónapra meghatározottakat, bár mértéke néhány esetben elmaradt attól (5.4 és 5.5 ábra).



5.4 ábra Az öntözött és a kontroll kezelések állományon belüli léghőmérséklet eltérései a hónap öntözött szakaszában



5.5 ábra Az öntözött és a kontroll kezelések állományon belüli relatív légnedvesség tartalmi eltérései a hónap öntözött szakaszában

Megmaradt az öntözött állomány éjjeli szárazabb volta, de az éjszakai órák nedvességbeli változékonysága az átlagban gyakran elmosódott.

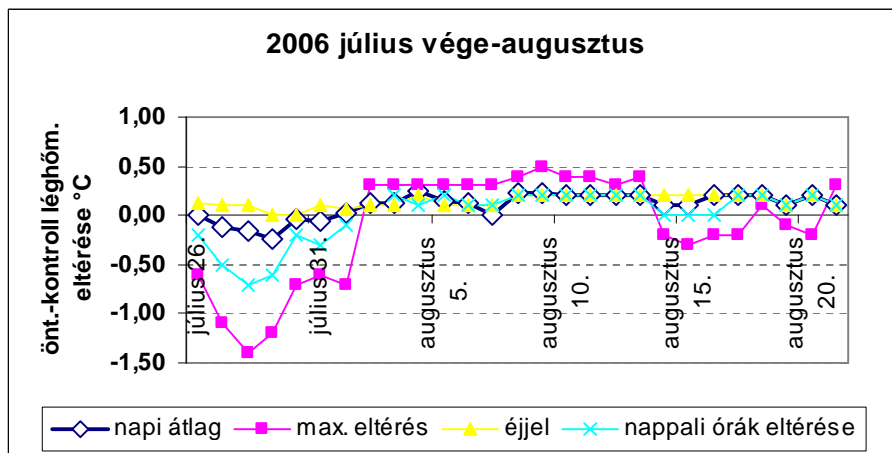
2003 augusztusa száraz-forró hónap volt, s a kontroll növények már augusztus első dekádjában elvesztették zöld leveleiket, mindkét vízellátásnál kényszerérés következett be. Ennek ellenére szenzorainkat az öntözött növények teljes leszáradásig kihelyezve hagytuk, de a mérés legvégén már csak elszáradt növények maradtak, ezért mikroklíma elemzésünkől a következtetések levonásától tartózkodtunk.

5.2 Az öntözés hatása a mikroklíma két elemére 2006-ban

2006 időjárása júliusban tette szükségessé az öntözést, mely hónap az átlagnál jóval melegebb (+2,1°C) és szárazabb (-50 mm csapadék) volt. Az öntözés hatása 2006-ban a 2003-ra meghatározott tendenciát követte, de annál mérsékeltebb volt. 2006 júliusában az adatgyűjtő meghibásodása miatt csak július végétől tudtuk értékelni méréseinket.

Az állományon belüli öntözés hatására bekövetkező léghőmérséklet csökkenés csak a nappali órákra korlátozódott, s az is csak az öntözést közvetlenül követő időben. Az öntözést követő napon 0,7 °C-al hűvösebb a kiegészítő vízellátású állomány levegője. A legnagyobb eltérés egy-egy tíz perces átlagban -1,3 - -1,4°C. A hatás a vízkijuttatás idejétől távolodva fokozatosan mérséklődik, s mintegy 1 héten belül mind az eltérés nagysága, mind iránya

ellenkezőjére vált (5.6 ábra). Az előjel módosulás ideje egybeesik a rendkívül hideg, csapadékos augusztus beköszöntével (havi középben: -2°C és $+75\text{ mm}$ csapadék).

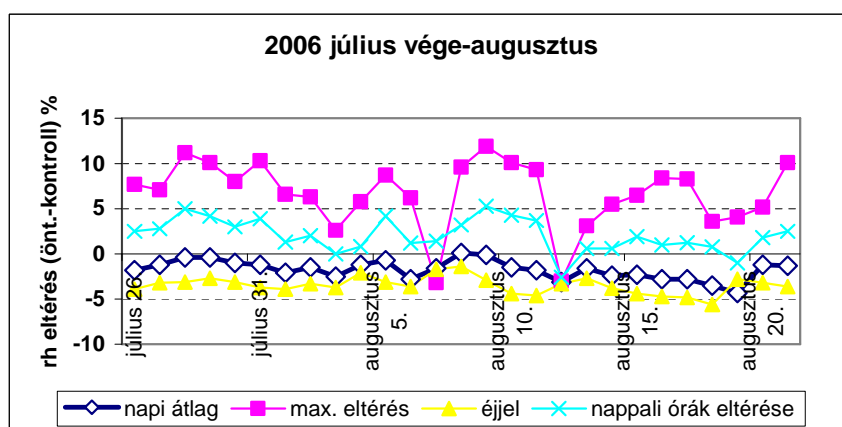


5.6 ábra Az öntözés hatása az állományon belüli léghőmérsékletre

Az éjszakai órákban a korábbi megfigyeléssel analóg, az öntözött kezelés a melegebb, mely viszont időjárástól függetlenül folyamatosan jelen volt, így a hűvös augusztusban is lásd. még 2003 értékelését. A napi átlagban ez a magasabb éjszakai hőmérséklet öntözés után még nem dominált, de a hűvös augusztus során a zártabb öntözött kezelés magasabb állományi léghőmérséklete esetenként éjszaka elérte, sőt meghaladta a nappali órákban mért változás mértékét, így az egész napi átlag a kiegészítő vízkezelésű növényeknél bár csak $0,1^{\circ}\text{C}$ -os, de mégis pozitív előjelet vett fel. Ez olyan csekély mértékű eltérés, mely alapján öntözés állományon belüli léghőmérsékletre kifejtett hatásáról a hűvös-csapadékos augusztusban nem beszélhetnénk, mégis említést érdemel.

A relatív légnedvesség alakulásában a 2003-ra meghatározott napi menet tendenciája változatlanul megmaradt, csak esetenként csekélyebb mértékben.

Az öntözés relatív légnedvességre kifejtett hatásáról készült összefoglaló ábra (5.7 ábra) alapján megállapítható, hogy hasonlóan az állományon belüli léghőmérséklethez, a cső szinti légnedvességben is a vízkijuttatás után mérhető a legnagyobb eltérés, mely a nappali órák átlagában max. 5%. Hűvös-csapadékos időben az érték még tovább csökken.



5.7 ábra Az öntözés hatása az állományon belüli légnedvességre 2006 nyarán

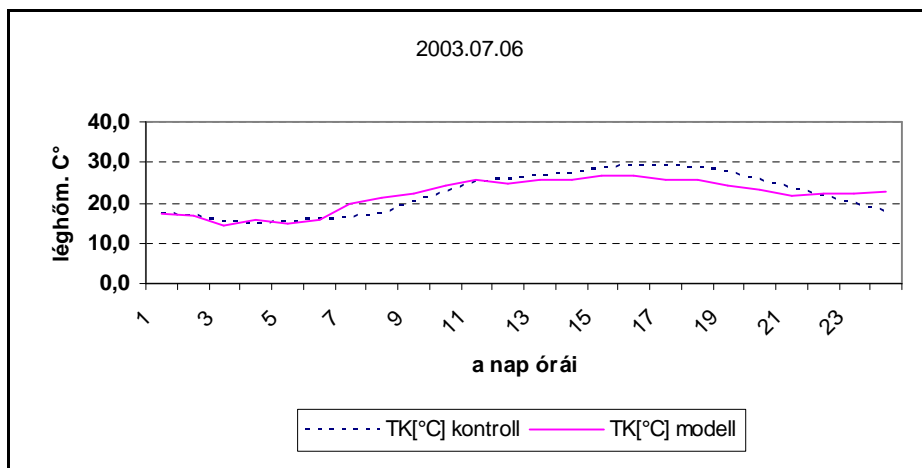
Az éjszakai órákban folyamatosan az öntözött kezelés a szárazabb, melynél a változás mértéke az idő előrehaladásával növekedett. Ennek megfelelően kezdetben csak az éjszakára kiterjedő, majd augusztusban a csapadékos periódus miatt az egész napra jellemző szárazabb öntözött állomány miatt a napi átlagok is elmaradnak a kontrolltól. A kisugárzást jobban visszatartó nagyobb zöldfelület miatt melegebb öntözött növényeknél a nagyobb nedvesség befogadó képesség miatt a relatív légnedvesség alacsonyabb. A jelenség 2003-ban is megfigyelhető volt.

6. A mikroklíma elemek számítása modellezéssel

A szimulációt minden évjáratban július-augusztus hónapokban végeztük, amikor az állomány teljesen kifejlett volt, s ahol öntözni kellett, ott már az első kiegészítő vízellátások is megtörténtek.

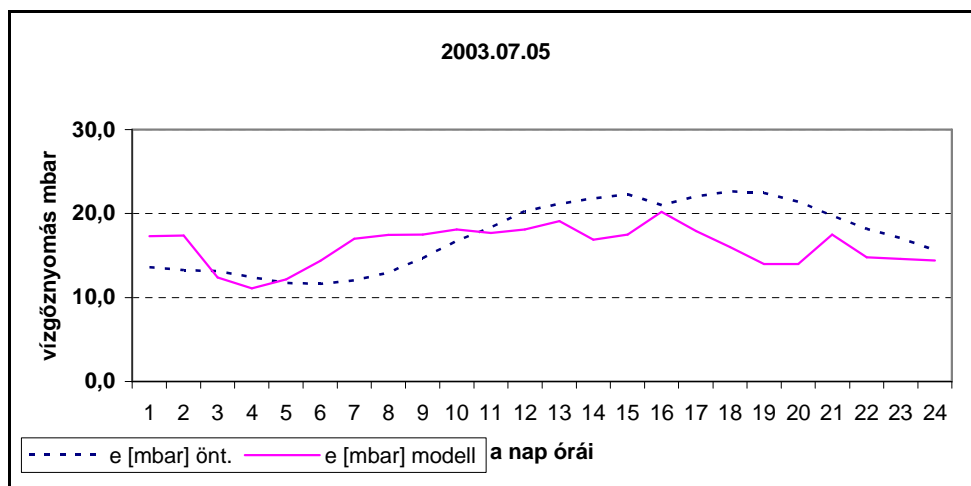
6.1 A kezdet: 2003

A vizsgálat évében előzetes modell-futtatásokat végeztünk az állományzáródást követő időszakban. A léghőmérséklet szimulációja mindkét vízellátású állományban a napi átlagokat tekintve megfelelően minősíthető, mivel **júliusban** az eltérés a mért és a modellezett -cső szintjére megállapított- léghőmérséklet között 1°C körül, vagy az alatt maradt (6.1 ábra). Az eltérés azonban nem volt egyirányú a nap különböző óráiban. Tenyészidőszakra kiterjedő jelenség a kora délelőtti órák magasabb modellezett léghőmérséklete, mely délután ellenkező előjelűre vált. Egy-egy óra esetén előfordult, hogy az eltérés a mért és a modellezett érték közt elérte a 2°C -ot is. Az öntözés a változás irányát nem módosította.



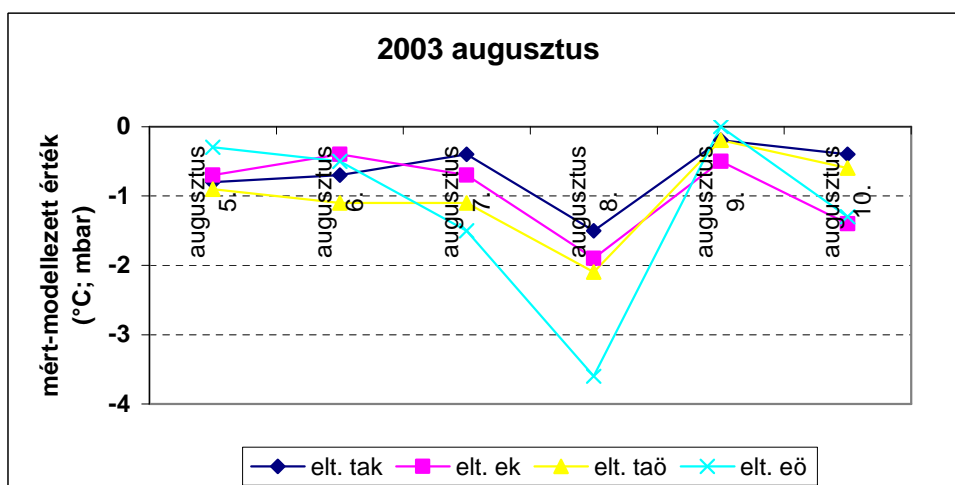
6.1 ábra A cső szintben mért (TK[°C] kontroll) és számolt (TK[°C] modell) léghőmérséklet napi változása a nem öntözött kezelésben

A légnedvesség modellezése a léghőmérsékletnél jelentősen pontatlanabb. A modell mindkét vízellátásnál kiegyenlítettebb napi változást számol (6.2 ábra). Nincs különbség a kontroll és az öntözött kezelés cső szintű vízgőznyomás értékének szimulációs pontosságában, mivel mindkét esetben a napi átlag alapján számolt hiba (eltérés mértéke a mért középérték %-ában kifejezve) a 10%-ot mindössze néhány tized százalékkal haladta meg. Ez azonban félrevezető, ha az egyes óraértékek eltérés irányainak napi változásait is tekintetbe vesszük. A modell a hőmérséklethez hasonlóan a délelőtti órák vízgőznyomás értékeit felülbecsli, s délután pedig jelentős alulbecslés lép fel (egy-egy órában a különbség elérte a 6-8 mbar-t). A valóságban mért légnedvesség nagyobb változékonyságot mutat, mint a modellezett érték.



6.2 ábra A cső szintben mért ($e[\text{mbar}]\text{önt.}$) és számolt ($e[\text{mbar}]$ modell) vízgőznyomás napi változása az öntözött kezelésben

A korábbi hónapokhoz hasonlóan **2003 augusztusában** sem különbözött egymástól a két eltérő vízkezelés mikroklíma értékeinek (napi átlag) szimulációs pontossága (6.3 ábra).



6.3 ábra A két mikroklíma elem mért és szimulált értékének különbsége abszolút értékben (léghőmérséklet, t_a °C; vízgőznyomás, e mbar) a napi átlagaik alapján. A k jelölés a kontroll, az $ö$ rövidítés az öntözött kezelést reprezentálja.

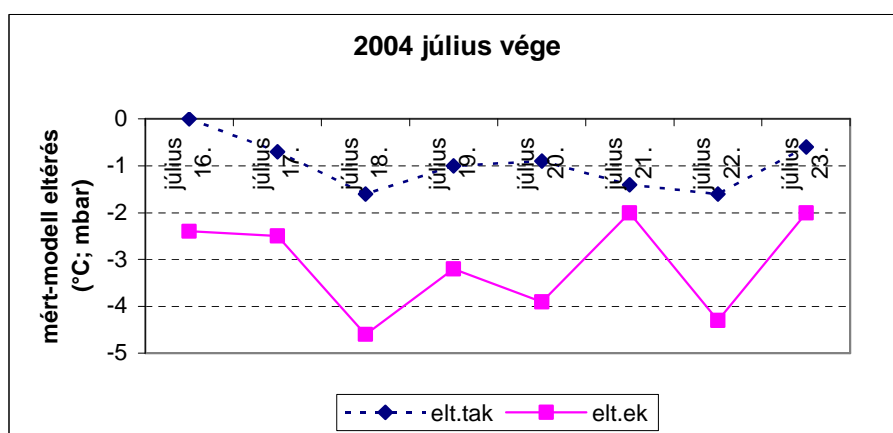
Az ábrán a mért és szimulált érték differenciájának napi átlagait mutatjuk be abszolút értékben. A %-os eltérések (a hiba) közt lényeges különbség az eltérő vízkezelésű állományoknál nem jelentkezett, s a mértékük mindkét elemnél jóval 10 % alatt maradt. Az eltérés iránya is állandó; a modell a napi átlagban rendszeresen felülbecsli a mikroklíma vizsgált elemeit. A léghőmérséklet hibája a kontrollnál 2,7%, az öntözötnél 5,3%. A légnedvesség esetében ugyanezen értékek 5,7% és 6,5%. A becslés hibája alapján nem találtunk különbséget a léghőmérséklet és a légnedvesség szimulációja között. Nem szabad figyelmen kívül hagyni, hogy ezen hiba a napi közepekre vonatkozik. Ettől jelentősen nagyobb eltérések is jelentkeztek egy-egy órában, mind a léghőmérsékletnél, mind a légnedvességnél. Különösen az éjszakai órák szimulációja látszik bizonytalanabbnak. Vagy az éjfélig tartó szakasz, vagy a 0.00 órától napkeltéig tartó időszak szimulációja esetenként

lényeges eltérést mutat a valóságban mért értékektől. A nappali órák hiba %-ai kedvezőbb képet nyújtanak. A napi változásokban az éjszakai órák esetén jelentős felülbecslés, nappal is a legtöbb órában felülbecslés van, de szinte minden egyes mintanapnál találunk néhány olyan órát, ahol alulbecslés a jellemző (változó megjelenési idővel). Ez az eltérő irányú változás a napi átlagokban kiegyenlítődhet, s a 10% alatti napi átlagos becslési hiba a fentiek szerint kezelendő.

A modellezett elem változékonysága néhány mintanapon nem követte a valóságban mért időbeli változékonyságot, s a modell a „finom” eltérések megjelenítésében gyengébb tulajdonságokkal rendelkezett.

6.2 Eredmények 2004-ben

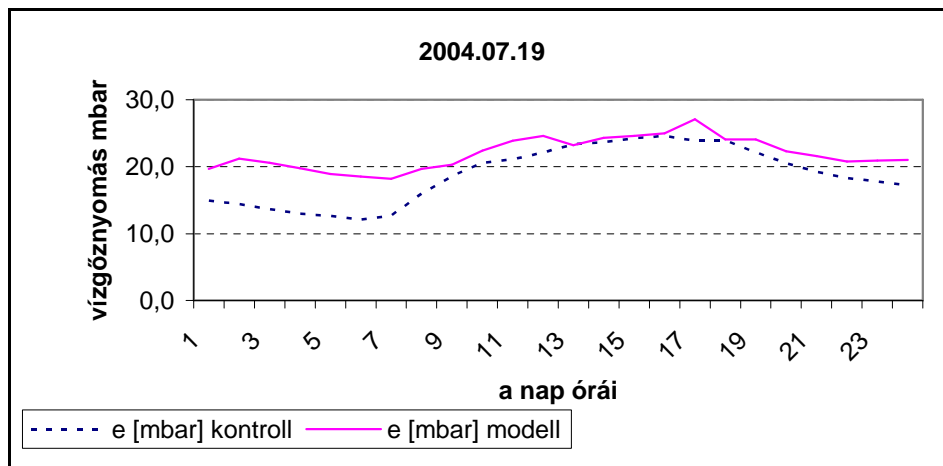
Az állományszáródás utáni időszakban a léghőmérséklet becslésének pontossága július második felében napi átlagban (6.4 ábra) jól egyezett a korábbi évre meghatározottal (napi átlagok alapján 1°C-on belüli becslést, ill. 4,1% hibát jelezve).



6.4 ábra A mikroklima elemek becslésének eltérései a mért értékektől

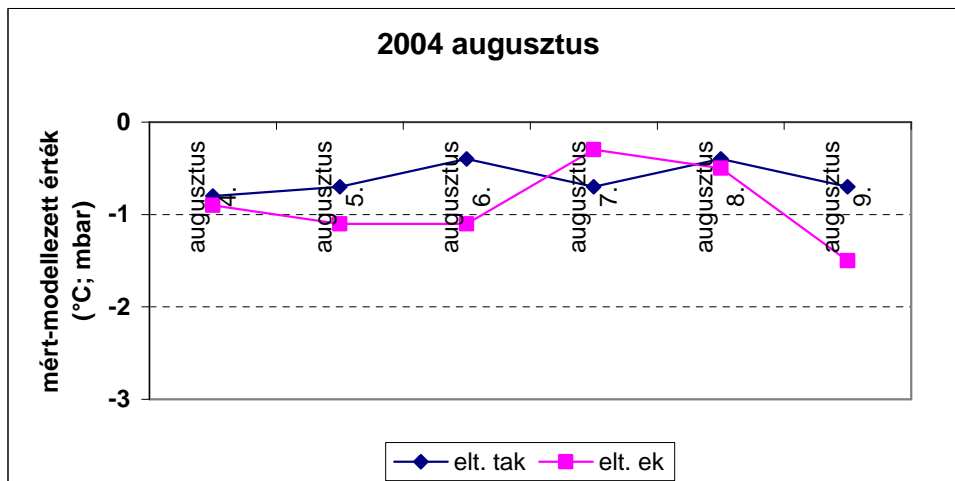
Bár egy-egy rövidebb periódusban előfordult ellenkező előjelű modellezett becslés, az időszak 90%-ában a modell felülbecsli az állományon belüli, cső szinti léghőmérsékletet. A délelőtti órák erőteljesebb eltérése – a modellezett léghőmérséklet mértet jelentősen meghaladó volta,- a korábbi évhez hasonlóan 2004-ben is jelentkezett.

A modellezett légnedvesség 2004-ben sem éri el a léghőmérsékletben tapasztalt pontosságot, sőt a hiba meghaladja a korábbi évre meghatározott mértéket. Napi átlagban július második felének vizsgálati időszakát tekintve az eltérés a mért értékektől 3 mbar, mely 16%-os becslési hibát jelent. A különbség a két érték között napszaktól függetlenül a modell mértnél magasabb légnedvesség szimulációját jelenti (6.5 ábra). Az éjszakai órák modellezett mutatóinak eltérései többszörösen meghaladják a nappali órákra számoltakat, mely a napi átlag becslési pontosságát alaposan lerontja. A kizárólag napsütötte órákra számolt hiba mintegy a fele a teljes napi átlagra meghatározottnak. A léghőmérsékletben tapasztalt differencia, –szimulált állomány valóságosnál egy kissé magasabb hőmérséklete- nem ad magyarázatot a légnedvességben megfigyelt eltérés mértékére, különösen az éjszakai órákban nem.



6.5 ábra A légnedvesség szimulációjában tapasztalt eltérések napszakonkénti alakulása

2004 augusztusának modellezési eredményei hasonló tendenciájúak voltak, mint a megelőző 2003-as évjárat azonos időszakáé (6.6 ábra).



6.6 ábra A kontroll parcella léghőmérsékletének és vízgőznyomásának napi eltérései

Az augusztusi szimuláció cső szinti léghőmérséklet becslésének pontossága $0,8^{\circ}\text{C}$, ugyanitt a vízgőznyomás mérési időszakra számított eltérése a hónap első felében 1,1 mbar. Nemcsak az abszolút értékek eltérésének mértéke, hanem a hiba % is az előző évihez hasonló volt (léghőmérséklet: 4,2%; vízgőznyomás: 5,9%). A napi átlagos eltérés 2003-as tenyészedőszakkal megegyezően mindenütt a modell mindkét elemre kiterjedő a mérteknél magasabb érték szimulációját erősítette. Ami eltért a korábbi évtől, az a vizsgált meteorológiai elem napi változása. Ebben az időszakban az éjszakai órákban a mértnél jóval magasabb modellezett értékek nem jelentkeztek, mindössze két napon tapasztaltunk a korábbi évben megfigyelttel analóg jelenséget, s ott is mindössze néhány órára kiterjedően. 2004 során a 2003-ban gyakorlatilag a teljes mérési időszakra leírt léghőmérsékletben és vízgőznyomásban egyaránt fellépő éjszakai jelentős felülbecslés elmaradt. A változás iránya megmaradt, de kiegyenlítettebb lett a mért és szimulált mutatók közti differencia.

A vízgőznyomás napi változásai inkább közelítették a korábban megismert napi meneteket. Az éjszakai órák mérténél jelentősen magasabb számolt értékei 2004-ben is jellemzőek voltak a nappali órák pontosabb közelítései mellett. Ami eltérés az időszak egyes

mérési napjainak eredményei között tapasztalható volt, az a nappali órákra kiterjedő csökkent hibával rendelkező becslés időtartama, mely esetenként mindössze néhány 20 perces átlagra terjedt ki. Ebben az évben a modell egész napra kiterjedő kiegyenlítettebb közelítése kevésbé volt jellemző.

6.3 2005 tenyészidőszakának szimulációs eredményei

A léghőmérséklet modellezett értékeinek magasabb volta továbbra is megmaradt. A napi átlagra számolt abszolút eltérés néhány tized fokkal ugyan meghaladta a korábbi két évjáratra meghatározott 0,8 és 0,9°C-ot, bár a becslés hibája még így is mindössze 4,4%. Júliusban napnyugta idején egy-két órán át a modellezett hőmérsékletek, szemben a teljes napon fellépő tendenciával, elmaradtak a mért léghőmérsékletektől. Ezt a korábbi években csak egy-egy alkalommal, s rövidebb ideig tapasztaltuk, bár magyarázatot nem találtunk rá.

A vízgőznyomás éjszakai óráinak magasabb becslési hibája 2005 júliusában is megjelent. Az éjszakai órák jellemző felülbecslése magas napállásnál, s főképpen délután átmenetileg alulbecsléssé alakult (lásd. még a hasonló jelenséget 2003 júliusában, ill. 2004 délutáni becsléseinek korábbiaktól eltérő voltát).

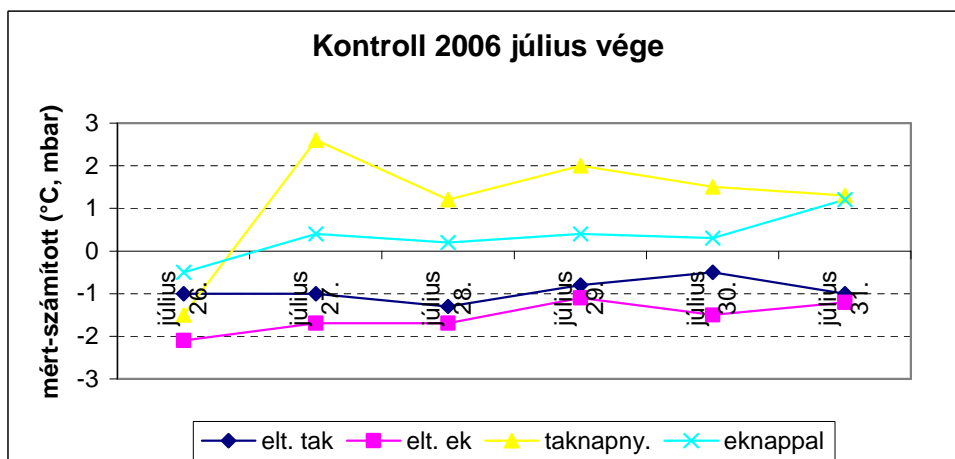
A légnedvesség becslés pontossága napi átlagban 7,6%, megtévesztő lehet, mert két napszakban, éjjel és nappal a változás eltérő irányú, s így kiegyenlíthetik egymást. Az éjszakai órák túlbecslésére továbbra sem tudunk magyarázatot adni, mely meghaladja a 15%-os hibát is. A várakozással ellentétesen a nappali órákban az állományi légnedvesség közelítése sokkal pontosabb, így a transzspiráció idején a 4-5%-os eltérés alapján a modell jól alkalmazható akár mikroklíma, akár növényi életfolyamatok elemzésére. A modell-becslés „durvább” mikroklíma közelítése a korábbi évekhez hasonlóan továbbra is jellemző.

A szél kiegyenlítő hatása a mikroklíma elemeiben közismert. Meglepetésként szolgált, hogy a modell futtatások szeles napokon pontosabb közelítést adtak, mint teljes szélcsend idején. Szeles napokon napi átlagban a mért és szimulált napi átlagos vízgőznyomás közt eltérés nem volt. A léghőmérséklet esetén 0,3°C a differencia, mely megfelel 1%-os becslési hibának. A mért és szimulált értékek eltéréseinek tendenciái a nem szeles napokhoz képest nem változtak, csak jelentősen mérséklődtek.

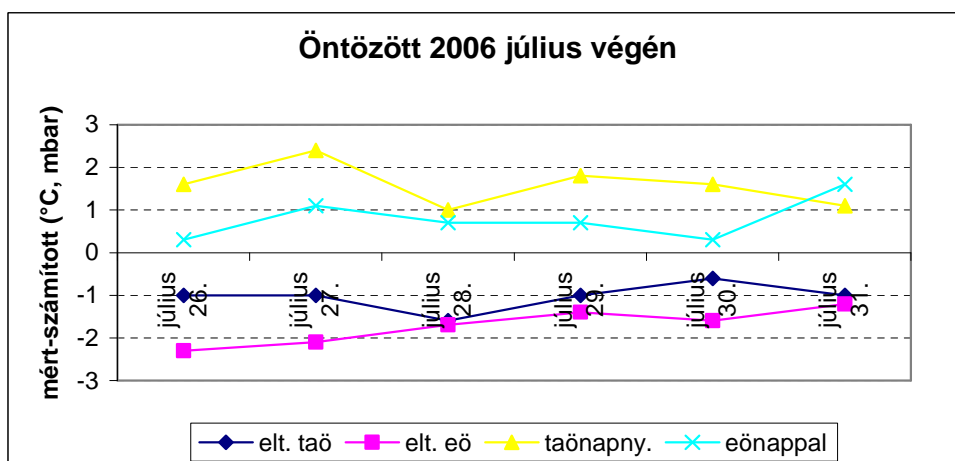
2005 rendkívül csapadékos augusztusában a modell-futtatásaink csődöt mondtak. A csapadékos napokon korábban is tapasztaltunk problémát, a számított értékek olyannyira elszakadtak a valóságtól, hogy eredményeink ezekre a napokra felhasználhatóak nem voltak.

6.4 Az utolsó évjárat: 2006 nyara

A korábbi évekkel teljesen megegyezően júliusban a léghőmérséklet mért és becsült napi közepeiből meghatározott időszak átlag eltérése a kontroll kezelésnél -0,9°C (hiba %: 3,8), az öntözöttnél -1°C (hiba %: 4,2) volt (6.7 és 6.8 ábra). Ugyanezen időszakra számított mutatók a cső szinti vízgőznyomás esetében sem különböztek a korábbiaktól egyik vízkezelésben sem. A kontroll kukorica időszaki vízgőznyomás átlaga -1,5 mbar, az öntözötté -1,7 mbar. A becslés hibája mindkét vízellátási szinten 10 % alatti volt, így a közelítés jónak tekinthető (kontroll: 7,4%; öntözött: 8,1%). Az idézett ábrákon feltüntettünk még két mutatót, melyek ismerete a becslés pontosságának megítélésékor feltétlenül szükséges. Az egyes meteorológiai elemek napi változásainak áttekintésekor -vízkezeléstől függetlenül- elemenként eltérő időben minden mérési napon a napi átlagtól jelentősen eltérő irányú és mértékű anomáliát tapasztaltunk.

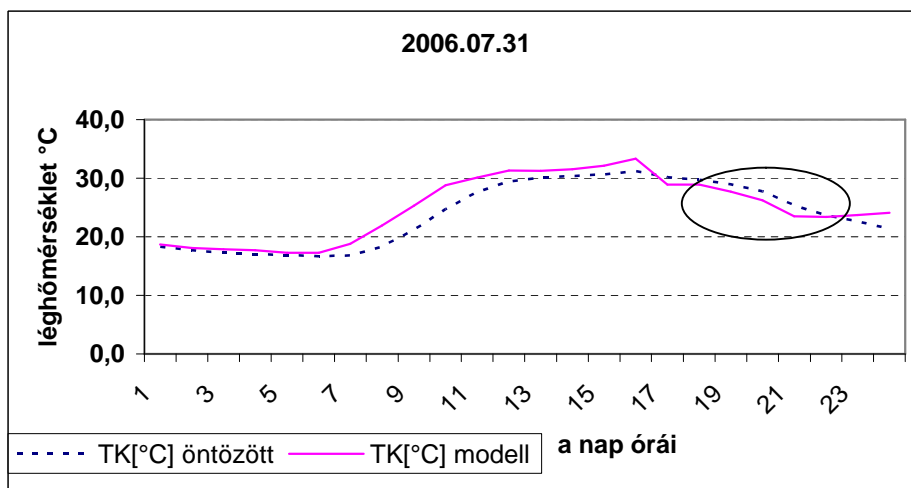


6.7 ábra A cső szinti léghőmérséklet jellemző mutatói 2006 júliusában a nem öntözött (*k*) kezelésben. A *ta* és *e* jelölés a léghőmérsékletet és a vízgőznyomást rövidíti. A *napny.* a késő délutáni 3-5 órát, a *nappal* rövidítés pedig a 8-19 óra közötti időszakot jelöli



6.8 ábra A cső szinti vízgőznyomás jellemző mutatói 2006 júliusában az öntözött (*ö*) kezelésben. Az előző ábrához hasonlóan a *ta* és *e* jelölés a léghőmérsékletet és a vízgőznyomást rövidíti. A *napny.* a késő délutáni 3-5 órát, a *nappal* rövidítés pedig a 8-19 óra közötti időszakot jelöli

A léghőmérsékletet a modell napnyugta idején (3-5 óra) szemben az egész napon fellépő felülbecsléssel, jelentősen alulbecsli. Az egy-egy mérési napon jelentkező eltérés július végére meghatározott átlaga mindkét vízellátásnál meghaladja a másfél fokot (1,6 és 1,8°C), egy-egy mérési napon még a két fokot is. Az öntözött kezelésben a léghőmérséklet szimuláció egész napra meghatározotttól eltérő irányú változásának mértéke erőteljesebb, s fennállásának ideje egy-két órával hosszabb volt (6.9 ábra). Az ábrán ellipszissel jelöltük az eltérések megjelenését. A másik anomália a vízgőznyomás szimulációjánál tapasztalható, ahol a délutáni órákban a nap többi időszakától eltérően a mértnél folyamatosan alacsonyabb értékeket számolt a modell.



6.9 ábra A léghőmérséklet szimulációja a napi változás alapján az öntözött kezelésben 2006. július utolsó mintanap alapján

Szemben a léghőmérséklet szimulációjában tapasztalttal, a vízgőznyomás mérténél alacsonyabb becslése mindkét vízellátásban hasonló mértékű volt, s a megjelenés idejében sem tapasztaltunk differenciát. A két meteorológiai elem, a léghőmérséklet és a vízgőznyomás becslési anomáliájának megjelenési időpontja is jelentősen eltért egymástól. Addig, amíg a hőmérséklet ismertettelt eltérő irányt adó becslése napnyugta idején, s az után jelentkezett, a vízgőznyomás becslésében a mérténél alacsonyabb szimulációk már jóval korábban, magas napállásnál (11 óra után) kezdődtek, s általában napnyugta idejére már legtöbbször meg is szűntek. A vízgőznyomás anomáliája időben tovább tartott, mint a léghőmérséklet szimulációs differenciája. A vízgőznyomás esetében, a korábbi évek mindegyikében megfigyelttel egyezően mindkét vízellátásnál jellemző volt az éjszakai órák szimulált értékeinek mérténél jelentősen magasabb volta. A maximális eltérés egy-egy 10 perces átlagban a kontrollnál 4,7 mbar, az öntözött növényeknél 6 mbar volt. (A nappali órák maximális eltérése a kezelések fenti sorrendjében 4, ill. 4,7 mbar.) Ez a differencia a napi eltérés iránnyal ellentétes, így a napi átlagok értelmezésékor –ennek figyelmen kívül hagyása– az alkalmazót erősen félrevezetheti. 2006 júliusának éjszakáin a mért léghőmérsékletnél a számolt érték csak csekély mértékben –néhány tized °C– volt magasabb.

A két vízkezelés szimulációjának összevetése alapján megállapítható, hogy a becslések változékonysága az öntözött növényeknél nemcsak a vízgőznyomásban, hanem a léghőmérsékletben is magasabb. 2006 júliusának végén tapasztalt legnagyobb 20 perces léghőmérsékletbeli eltérés a kontrollnál 3,5°C, az öntözötnél 4,3°C volt.

Ebben az évben az OMSZ által közösen üzemeltetett automata a hónap elején tönkrement, s cseréje majdnem két hetet vett igénybe, ezért bemenő meteorológiai input hiányában a modellt futtatni a hónap első felében nem tudtuk. Később az időjárás csapadékosra fordulása több napon át akadályozta a szimulációt. Ismételt próbálkozásainknál, 2006 augusztusának második felében és szeptemberben sem változott a korábbi időszakban meghatározott különbség a mért és szimulált mikroklíma elemek közt. A léghőmérséklet szimulációjában a napi átlag eltérése változatlanul 1°C közeli (felülbecslés, 5,6% hiba), a napnyugta 3-4 órájában ugyanekkora értékű, de ellentétes irányú becsléssel. Szeptemberben a léghőmérséklet becslési pontossága némiképp javul (0,6°C; hiba %: 4,6).

A vízgőznyomás éjszakai órára kiterjedő felülbecslése továbbra is rendkívül magas, s a napközbeni időszakban az alulbecslés is megmaradt. Ennek ellenére a hiba a korábbiaknál valamivel alacsonyabb, a tenyészidőszak végére abszolút értékben a napi átlagokban 0,8 mbar, mely megfelel 5% körüli becslési hibának. Itt is fontos kihangsúlyozni a különböző

napszakok becsléseinek eltérő irányú alakulását, mely a napi átlagban kiegyenlítő hatással bír. A modell által számolt napi menetek változékonysága egyik elemnél sem érte el a mért meteorológiai elemek valóságban jelentkező változékonyságát.

FONTOSABB KÖVETKEZTETÉSEK

1. A növény-környezet közismert kölcsönhatásának eredményét, *állományklíma mérést és modellezést* végeztünk négy egymást követő évjáratban. A modellezést a szokásos egyetlen kiemelt mintanap elemzésétől eltérően kifejlett állományban *hosszabb periódusban* tekintettük át.

2. Korábbi helyben végzett megfigyelésekkel egyezően a növényi felszínhőmérséklet alapján végzett öntözés takarékos vízfelhasználást és jelentős terméstöbbletet eredményezett. A 2003-2006 közti időszak négy évéből kettőben öntöztünk, míg a másik két nyár humid jellegű volt.

3. A kis adagú öntözés hatása a mikroklíma elemeinek napi átlagára csekély, s az éjszakára is kiterjedő eltérések ismerete nélkül akár félrevezető is lehet. A kiegészítő vízkezelésű növényeknél a nappali órákban –főképpen a beavatkozást követő néhány napban- hűvösebb (kb. -1°C) és nedvesebb (rh eltérés: 5%) az állományon belüli légtér. Éjszaka nem várt jelenségeként a nagyobb felületű és „zártabb” vízkezelt állomány melegebb, s ennek megfelelően szárazabb is lehet. Volt olyan időszak, ahol az öntözött növények éjszakai mikroklímájának változása a nappali órákéval ellentétes tendenciájú, s azt csaknem elérő mértékű volt.

4. Állomány feletti referenciaszintről származó meteorológiai adatok hiányában a meteorológiai állomások adatai is használhatók szimulációs modell inputjaként. Akik eddig meteorológiai adathiány miatt tartózkodtak a modell használatától, újra áttekinthetik lehetőségeiket.

5. Négy vizsgált évben mikroklíma szimulációt kifejlett állományokban végeztünk, de nem minden napon sikeresen. A csapadékos mintanapok többségén a modell vagy el sem indult, vagy a szimulált érték jelentősen elszakadt a valóságosaktól. A szél jelenléte nem zavarta a szimulációt, sőt a teljesen szélcsendes napok okoztak esetenként futtatási problémát. Legeredményesebbnek a derült napokon végzett futtatások látszanak. Négy év kifejlett állományára vonatkozóan napi átlagban a cső szinti léghőmérséklet becslési hibája abszolút értékben 1°C közeli (becslési hiba %: 3-6), a légnedvességé esetenként ennél valamivel gyengébb, de legtöbb esetben 3 mbar alatti (hiba: 6-16%) volt. A napi átlag azonban erősen változó napszakos menet eredménye lehet. Az éjszakai órákban több alkalommal mindkét mikroklíma elemre kiterjedően a napi órák átlagával ellentétes irányú –néhány órában azonos nagyságú- eltérés jelentkezett, így a napi átlagra meghatározott hiba % félreérthető. A légnedvesség esetében tapasztalt éjszakai órák túlbecslése különösen nagy mértékű (valamennyi évjárat több időszakában akár a 20%-os hibát is meghaladóan). A modell alkalmazásakor a fenti változékonyság ismerete és figyelembe vétele az alkalmazás eredményességét befolyásolja.

6. Nem volt eltérés a két vízkezelés szimulációjának pontosságában.

7. A szimulációs modellezést a négy évben többször alkalmaztuk a globális felmelegedés várható növényre vonatkozó hatásainak becslésére is. Bár az OTKA pályázatban ezt nem tűztük ki célul, a pályázatban foglalt közelítés gyakorlati célú felhasználása szempontjából

fontosnak tartottuk a téma-bővítést, melynek megfelelően a publikációknál az OTKA támogatás tényét minden esetben feltüntettük. Lásd. publikációs listát.

IRODALOM

- Anda, A. 1993. Az infravörös termometria alkalmazása növényi vízforgalom meghatározására. Kandidátusi értekezés.
- Anda, A. 2001. Az állományklímát befolyásoló néhány eljárás mikrometeorológiai elemzése. Akadémiai Doktori Értekezés.
- Anda, A. 2002. Slices of plant-water relation in reflection to investigations carried out at Agrometeorological Research Station of Keszthely. *Időjárás*, 106. No. 3-4: 137-160.
- Anda, A., Lőke, Zs. és Varga, B. 2003. A standard meteorológiai állomás adatainak felhasználási lehetősége szimulációs modell inputjaként. *Léggör* 2:28-33
- Anda, A., Lőke, Zs. és Sz. Kirkovits M. 2002: Kukorica néhány vízháztartási jellemzőjének szimulációja. *J. of Central European Agriculture*, Vol. 3. No.2: 95-103.
- Chen, J., 1984. Mathematical analysis and simulation of crop micrometeorology. Ph.D. Thesis, The Netherlands.
- Evans, G. C. 1972., *The quantitative analysis of plant growth*. Blackwells, Oxford.
- Goudriaan, J., 1977. *Crop Micrometeorology: A Simulation Study*. Simulation monographs. Pudoc, Wageningen.
- Goudriaan, J. and van Laar, H. H. 1994. *Modelling Potential Crop Growth Processes*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht-Boston-London. P: 238.
- Jackson, R. D., 1982. Canopy temperature and Crop Water Stress. *Advances in Irrigation*, Vol.1. pp 43-85.
- Jones, H. G., 1983. *Plants and Microclimate*. Cambridge Univ. Press, Cambridge. pp 323.
- Páll, J., Anda, A., and Hunkár, M. 1998: Különböző vízellátottságú kukoricaállományok mikroklímájának szimulációja. *Acta Geographica Debrecina* Tom. XXXIV. p: 41-60.
- Rosenberg, N. J., 1974. *Microclimate: the biological environment*. Wiley, New York.
- Sellers, W. D., 1965. *Physical climatology*. Chicago, Univ. of Chicago Press.
- de Wit, C. T., Goudriaan, J., 1978. *Simulation of ecological processes*. Wageningen, Pudoc.